

Opinnäytetyö AMK

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Infratekniikka

2024

Erik Sirkama

Teräsbetonisten lyöntipaalujen valmistus työmaaolosuhteissa



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Ohjaaja: DI Maarit Järvinen

2024 | 38 sivua

Erik Sirkama

Teräsbetonisten lyöntipaalujen valmistus työmaaolosuhteissa

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia teräsbetonisten lyöntipaalujen valmistusta työmaaolosuhteissa. Työssä selvitettiin, mitä hyötyä yritykselle on siitä, että teräsbetoniset lyöntipaalut valmistetaan työmaaolosuhteissa.

Työssä saatiin selville, että usein toteutuviissa työmaaolosuhteiden tilanteissa kustannustehokas ja ympäristöystävällinen tapa valmistaa teräsbetonisia lyöntipaaluja on työmaan välittömässä läheisyydessä.

Kustannuslaskennan esimerkin tietoja hyväksi käyttäen opinnäytetyön tuloksena saatiin Kymppibetoni Oy:lle tietyissä olosuhteissa kustannustehokas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto tuottaa teräsbetonipaaluja työmaaolosuhteissa sen sijasta, että teräsbetonipaalut kuljetettaisiin valmiina kiinteältä tehtaalta. Näiden tietojen avulla pystytään arvioimaan teräsbetonisten lyöntipaalujen valmistusta ja kilpailemaan muiden toimijoiden kanssa.

Avainsanat: teräsbetoni lyöntipaalu, paalun valmistus, kustannustehokkuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Civil Engineering

Instructor: Maarit Järvinen, M.Sc. Eng

2024 | 38 pages

Erik Sirkama

Manufacture of Reinforced Concrete Driven Piles in Worksite Conditions

The objective of this thesis was to study the manufacturing of reinforced concrete driven piles in worksite conditions. The study investigated the benefits for a company of casting reinforced concrete driven piles on site.

The findings revealed that, in typical construction site conditions, a cost-effective and environmentally friendly way to produce reinforced concrete piles is in the immediate vicinity of the construction site.

Using cost calculation example data, the thesis concluded that for Kymppibetoni Oy, under certain conditions, manufacturing reinforced concrete piles on-site is a cost-effective and environmentally friendly alternative to transporting pre-made piles from a fixed factory. This information allows for the assessment of on-site production of reinforced concrete piles and helps the company to compete with other industry players.

Keywords: reinforced concrete driven piles, pile manufacturing, cost-efficiency

Sisältö

KÄYTETTY SANASTO	6
1 BETONIPAALUPERUSTUKSET	7
1.1 Yleisesti	7
1.2 Tutkimusmenetelmä	8
2 TERÄSBETONILYÖNTIPAALU	9
2.1 Yleisesti	9
2.2 Betoniteräs	9
2.3 Teräsbetonipaalujen jatkaminen	10
2.4 Teräsbetonipaalun kärki	10
Kalliokärki	11
2.5 Rasitusluokat	12
3 TERÄSBETONIPAALUN VALMISTUS	14
3.1 Valmistuspaikka	14
Paalun valmistus työmaalla	15
3.2 Betonipaalujen valmistustoleranssit	15
3.3 Paalujen varusteiden toleranssit	17
3.4 Betonimassa	17
3.5 Raudoitus	18
3.6 Paalumuotti	20
3.7 Laadunvalvonta ja puristuslujuus	21
3.7.1 Puristuslujuus	22
3.7.2 Suora rakenteellinen lujuus	22
3.7.3 Epäsuora rakenteellinen lujuus	22
3.8 Valmiiden tuotteiden vaatimustenmukaisuus	23
3.9 Merkintä ja varastointi	24
3.10 Paalujen pystyyn nosto työmaalla	26
4 SIIRRETTÄVÄ PAALU- JA BETONITEHDAS	27
4.1 Yleisesti	27
4.2 Kalusto	27

4.3 Sääolosuhteet	28
4.4 Ympäristövaikutukset	29
4.5 Työmaan haasteet	29
5 TYÖMAALLA VALETUN PAALUN HYÖDYT	31
5.1 Teräsbetonipaalujen kuljetus	31
5.2 Kustannussäästöt	33
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	36
LÄHTEET	38

Kuvat

Kuva 1. Paalujatkos.....	10
Kuva 2: Teräsbetonipaalun ja pienpaalun kalliokärki.....	11
Kuva 3: BY65.....	12
Kuva 4: Siirrettävä paalutehdas.	14
Kuva 5. Valmistustoleranssit.	15
Kuva 6. Valmistustoleranssit.....	16
Kuva 7. Raudoitus valmiina kalliokärjillä varustettuna.	19
Kuva 8. Paalupeti.....	21
Kuva 9. Betonipaalun tuotekortti	25
Kuva 10. Paalun siirto työmaalla.....	26
Kuva 11. Paalun pystyyn nosto kohdan sijainti	26
Kuva 12. Siirrettävä betoniasema	28
Kuva 13 Valmis paalu kuljetus.	32

Taulukot

Taulukko 1. Paalun enimmäiskulmapoikkeaman luokat	16
Taulukko 2. Betonipaalujen mittojen ja betonipeitteen sallitut poikkeamat	16
Taulukko 3. Jänneterästen vähimmäismäärä.....	20
Taulukko 4. Valmiiden tuotteiden tarkastus.....	23
Taulukko 5. Kuljetuskustannusvertailu.	34

Käytetty sanasto

järkäle	paalutuskoneessa käytettävä työkalu, jolla paalu asennetaan lyömällä (RIL 254-2016)
koepaalu	paalu, joka tehdään ennen varsinaista paalutustyötä tai joka tehdään työn aikana. Paalun tarkoituksena on varmistaa valitun paalutyyppin soveltuvuus ja/tai varmentaa suunnittelu, mitat ja kestävyys (RIL 254-2016)
lyöntipaalu	Paalutyyppi, joka syrjäyttää maata ympärillään, kun se asennetaan maahan. Paalu lyödään maahan järkäleellä (RIL 254-2016)
maata syrjäyttävä paalu	paalu, joka asennetaan maahan kaivamatta tai poistamatta maata lukuun ottamatta maanpinnan nousun tai tärinän rajoittamista, vaikeasti läpäistävien esteiden poistamista tai tunkeutumisen helpottamista (RIL 254-2016)
paalu	kapea maassa oleva rakenneosa, joka siirtää kuormia (RIL 254-2016)
paalun kärki	paalun alapää (RIL 254-2016)
siirrettävä paalutehdas	siirrettävällä paalutehtaalla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä siirrettäviä metallisia paalupetejä ja siirrettävää betoniasemaa (Kymppibetoni)

1 Betonipaaluperustukset

Betonipaalujen käyttö uudisrakentamisessa on yleinen perustamistapa silloin, kun kantava maakerros on syvällä niin Suomessa kuin ulkomailla. Betonipaalu on edullinen ja kestävä. Betonipaaluilla saadaan varma perusta rakennuksille kohtuullisilla paalumäärillä.

Rakennusalan kehittyessä jatkuvasti on uusia menetelmiä kokeiltava. Rakentamisessa vähähiilisyys on merkittävä tekijä, jonka tärkeys korostuu tulevaisuudessa, joten uusien menetelmien kokeileminen on väistämätöntä ja välttämätöntä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, voidaanko betonipaalujen valmistamiseen liittyvillä valinnoilla vähentää rakentamisen päästöjä ja hiilijalanjälkeä. Opinnäytetyössä vertaillaan tilannetta, jossa betonipaalut valmistetaan kiinteällä paalutehtaalla ja siirrettävällä paalutehtaalla. Työn lopullisena tavoitteena oli selvittää, pystytäänkö vähentämään päästöjä ja pienentämään hiilijalanjälkeä, jos betonipaalut valettaisiin työmaalla. Tulokset voivat lisätä rakennusalan yrityksissä ympäristöystävällisiä toimintamalleja, kun tunnistetaan mahdollisuudet uusiin käytänteisiin.

Opinnäytetyön teoriaosuus käsittelee betonipaaluperustuksia, teräsbetonilyöntipaalua, teräsbetonipaalun valmistusta sekä siirrettävää paalu- ja betonitehdasta. Perusteiden tarkastelun jälkeen tutkimuskysymystä tarkastellaan erityisesti viidennessä luvussa, jossa arvioidaan teräsbetonipaalujen kuljetuksien ja kustannussäästöihin vaikuttavien tekijöiden näkökulmasta. Opinnäytetyön tilaajana toimii Kymppibetoni Oy.

1.1 Yleisesti

Betonipaaluja käytetään yleisesti tilanteissa, joissa rakennuksen perustaminen suoraan maahan ei ole mahdollista. Tällainen tilanne johtuu tyypillisesti maan heikosta kantavuudesta, erityisesti savi- ja pehmeikköalueilla. Paalut ovat olennainen osa rakenteita, jotka välittävät rakennuksen kuormituksen maaperään tai kallioon. Paalujen avulla varmistetaan rakenteen vakaus ja ehkäistään sen vaurioituminen.

Betonipaalut ovat välttämättömiä, kun maaperän ominaisuudet eivät riitä suoraan perustamiseen tai kun tarvitaan lisätukea epätasaisessa maastossa. Betonipaalujen käyttöönotto edellyttää huolellista suunnittelua ja valmistusta, joka mukautuu maaperän olosuhteisiin ja rakennuksen tarpeisiin. (Betoniteollisuus 2022.)

Suomessa yksi yleisimmistä maanvahvistustavoista on teräsbetoninen lyöntipaalu ja siihen päälle valettava paalulaatta (Rakennusteollisuus 2022). Paaluissa on kaksi tekijää, jotka ohjaavat kantavuutta: maaperän kantavuus ja paalun kantavuus. Paalun kantavuudessa tulee raja vastaan, jos maaperä pettää, oli paalu kuinka luja tahansa. Sama pätee luonnollisesti myös toisinpäin. Paalun geotekninen kantavuus tarkoittaa mitoitusarvoa, joka saadaan ottamalla huomioon sallitut painumat, että varmuus maapohjan murtumista vastaan. Paalun rakenteellinen kantavuus taas tarkoitetaan arvoa, joka saadaan ottamalla huomioon varmuus sekä paalun rakenteellista murtumista vastaan, että paalun sallitut muodonmuutokset. Paalun kantavuus tarkoittaa tavallisesti paalun pituusakselin suuntaista kantavuutta ja se on maksimissaan yhtä suuri kuin pienempi kahdesta edellä mainitusta kantavuudesta.

Paalut voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: kitkapaaluihin, tukipaaluihin, ja koheesiopaaluihin. Kitkapaalu pystyy siirtämään kuormansa pääosin kitkamaakerrokseen vaippapinnallaan vaikuttavan kitkan välityksellä. Tukipaalu pystyy siirtämään pääosan kuormasta kärjen välityksellä tiivisrakenteiseen maakerrokseen tai kallioon. Koheesionpaalu pystyy siirtämään kuormasta koheesiomaakerrokseen vaippapinnallaan syntyvän adheesion välityksellä. Talonrakennushankkeissa käytettävistä paaluista valtaosa on toiminnaltaan tukipaaluja. (RIL 254-1-2016)

1.2 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyön tutkimuksessa käytettiin laadullista tutkimusmenetelmää, jossa painottuvat kvalitatiivisen aineiston suosiminen, sitoutuminen tarkasti valitun osa-alueen lähelle menevään tarkasteluun ja keskittyminen konkreettisen toiminnan tutkimukseen, lisäksi huomioidaan mitä- ja miten kysymykset. (Kirsi Juhila, Tietoarkisto). Opinnäytetyössä perehdyttiin siihen liittyviin kirjallisiin lähteisiin ja haastateltiin kahta rakennusalan ammattilaista. Haastatteluissa käsiteltiin teräsbetonipaalujen valmistukseen ja kuljetukseen liittyviä kysymyksiä. Opinnäytetyön tilaajana toimii Kymppibetoni Oy.

2 Teräsbetonilyöntipaalu

2.1 Yleisesti

Esivalmistetussa betonipaalussa betonin nimellislujuus on vähintään C35/45. Paalun betonin nimellislujuusvaatimus on asennushetkellä lujuusvaatimus. Puristuslujuuden osalta betonin kelpoisuus osoitetaan olosuhdekoekappaleiden ja rakennekoekappaleiden avulla.

Standardi SFS-EN 12794 asettaa teräsbetonipaalujen mittojen toleranssivaatimukset. Sekä teräsbetoni- että jännebetonipaalujen betonin lujuusluokan tulee olla vähintään C35/45. (SFS-12794.)

2.2 Betoniteräs

Paalujen raudoituksena käytettävien terästen tulee täyttää rasituksiin nähden olla riittävät lujuus-, sitkeys- ja tartuntaominaisuudet. Lyöntipaaluissa pääterästen kokonaistasevenymän suositeltava arvo on vähintään 4,5 % ja murtolujuuden tulee ylittää nimellinen myötöraja vähintään 50 MPa:lla.

Paalujen pääteräksiksi suositellaan kuumavalssattuja teräksiä. Lyöntipaalujen pääteräksille soveltuvia teräsluokkia ovat mm. A700HW, A500HW, B500B ja B500C1. Hakateräkseksi soveltuu edellä mainittujen lisäksi myös teräs B400.

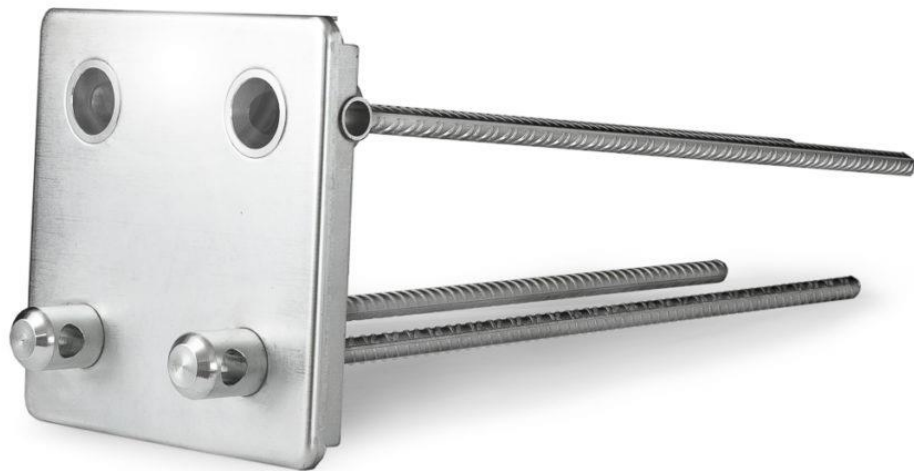
Terästen kelpoisuus voidaan osoittaa joko tyyppihyväksynnällä (STF-merkintä), standardeilla, CE-merkillä tai rakennuspaikkakohtaisella selvityksellä. Myös FI-merkintää pidetään hyväksyttävänä.

Hitsaamalla koottavien raudoitteiden osalta betoniterästen hitsattavuus on oltava riittävästi varmistettu. Tehdasvalmisteisten raudoitteiden kelpoisuus osoitetaan joko varmenustodistuksella tai rakennuspaikkakohtaisella selvityksellä. Myös FI-merkintää pidetään hyväksyttävänä. (RIL 254-1-2016)

2.3 Teräsbetonipaalujen jatkaminen

Esivalmistettujen teräsbetonipaalujen ja jännebetonipaalujen jatkosten on oltava standardin SFS-EN 12794 mukaan tehtyjä. Jatkoskappaleet paalujatkoksissa tulee kiinnittää osapaaluihin. Niiden asentaminen osapaalun valuun tulee tapahtua siten, että niiden sijainti valussa voidaan tarkastaa valmistuksen aikana, että valmiista tuotteesta.

Rakenteellisten osien, esimerkiksi osapaalujen liittämiseen tarvittavien lukitusosien laadusta vastaa paalun valmistaja. Paalujen ala- ja yläpintojen Pitää olla kohtisuorassa osapaalujen akselia vastaan. Osapaalujen välisten paalujatkosten pitää olla samankeskisiä osapaalujen kanssa. Paalujatkosten pitää muodostaa osapaalujen väliin samankeskinen liitos. (Kuva 1). Paalujatkokset testataan standardin SFS-EN 12794 mukaisesti. (RIL 254-1-2016.)



Kuva 1. Paalujatkos (Emeca Oy 2024).

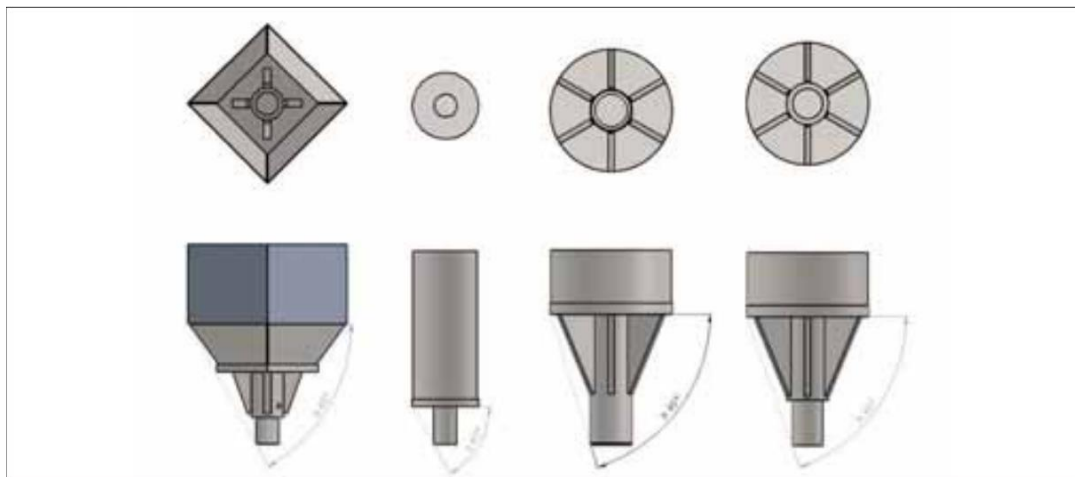
2.4 Teräsbetonipaalun kärki

Lyötävien paalujen kärjet suojataan ensisijaisesti kalliokärjillä. Kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija voi perustelluilla syillä määrätä käytettäväksi jotain muuta kärkityyppiä, esimerkiksi maakärkiä, joita ei nykypäivänä enää juurikaan käytetä. Perusteltu syy voi olla esimerkiksi helpot maaperäolosuhteet lyönnin kannalta. Paalu ei kuitenkaan saa mennä kivisten kerrosten läpi eikä tukeutumiskerroksessa saisi olla isoja kiviä.

Kallio- ja maakärjet tulee mitoittaa puristusrasitukselle siten, että ne kestävät kuormaa vähintään yhtä paljon kuin paalun edellytetään kestävän. Teräsbetonipaalut on varustettava kalliojärjillä, mikäli mahdollisuutta maakärjen käyttöön ei ole.

Kalliojärki

Kalliojärki on yleensä tehty rakenneteräksestä. Sitä voidaan käyttää suojelemaan paalun kärkeä kivien ja lohcareiden aiheuttamilta vaurioilta sekä keskittämään kuormituksia ja näin estämään taivutusrasituksen syntymistä. (Kuva 2.) Kallion pinnan ollessa riittävän tasainen liukumisvaaraa ei synny tai jos tukeva maakerros on riittävän tiivis ja paksu estää täten liukumisen.



Kuva 2: Teräsbetonipaalun ja pienpaalun kalliojärki (RIL 254-1-2016).

Rakenneteräskärjellisiä kalliojärjiä käytetään lähinnä teräksisissä suurpaaluissa, työaikaisissa teräspalkkipaaluissa, esimerkiksi telinepaalut, tai kevyesti kuormitetuissa teräspalkkipaaluissa, esimerkiksi meluesteperustuspaalut. (RIL 254-1-2016.)

2.5 Rasitusluokat

Käyttöikäsuunnittelu betonirakenteissa tarkoittaa rakenteiden kestävyys suunnittelua säilyvyyden osalta. Käyttöikäsuunnittelussa lähtötietona tarvitaan materiaali- ja rakenne-tietojen lisäksi ympäristöolosuhteet (rasitusluokat) sekä myös ajanjakson pituus, jonka rakenteen edellytetään kestävän (suunniteltu käyttöikä).

Rasitusluokat kuvastavat ympäristöolosuhteita minkälaisiin (rasituksiin) betonirakenne joutuu käyttöikänsä aikana. (Kuva 3.)

1. Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
 - XC1: pysyvästi vedenalainen paalu
 - XC2: märkä, harvoin kuiva. Paalujen yleisin rasitusluokka.
2. Kloridien (ei-merivesi) aiheuttama korroosio XD (esimerkiksi. maantiesuola)
 - Esiintyy paaluissa vain erittäin poikkeuksellisissa tapauksissa
 - XD2, mikäli pohjaveden kloridipitoisuus > 1000 mg/l
3. Kloridien (merivesi) aiheuttama korroosio XS
 - XS2, mikäli pohjaveden kloridipitoisuus > 1000 mg/l
4. Jäädytys-sulatusrasitus XF
 - Ei normaalisti esiinny paaluissa
5. Sulfaattirasitus XA
 - Määritellään maaperäanalyyysien, pohjavesianalyyysien tai vastaavien selvi-tysten perusteella PO-2016 OSA 1, kohtien 3.2.4 ja 4.7.6.2 mukaisesti.
6. Muu kemiallinen rasitus XA
 - Vaatimukset määritellään tapauskohtaisesti (esimerkiksi. kemiallisesti saas-tunut maa).

Kuva 3: BY65 2021

Paaluille voidaan myös määritellä normaalin XC-rasitusluokan lisäksi täydentäviä rasi-tusluokkia, jos siihen löytyy perusteltuja syitä. Tällainen olisi mahdollista esimerkiksi, jos maaperä/pohjavesi sisältää klorideja, sulfaatteja tai muuta kemiallista rasitusta. tämmöi- sessä tapauksessa pitoisuudet on selvitettävä joko maaperä- tai pohjavesianalyyseillä.

Toisena esimerkkinä voidaan nostaa esille, että paalut eivät normaalisti altistu pakkasrasitukselle, koska ne ovat maanalaisia rakenteita ja näin ollen XF-rasitusluokkia ei tarvita. Jäänsulatusaineet (XD-luokat) eivät myöskään normaalisti aiheuta paaluihin rasituksia, vaikka paalut olisivat esimerkiksi tierakenteen yhteydessä.

Paaluja käytettäessä laiturirakenteissa siten, että paalut ovat alttiina jäätymiselle ja merivedelle, on säilyvyysuunnittelua tehtävä laiturirakenteiden mukaisesti. XA-rasitusluokat valitaan pohjavesi- tai maaperäanalyysin perusteella. Suunnittelijan tulee määrittää muihin kuin sulfaattirasitukseen perustuvat XA-luokat ja tarvittavat kemiallisten rasitusten aiheuttamat vaatimukset. (BY 65 2021.)

3 Teräsbetonipaalun valmistus

3.1 Valmistuspaikka

Teräsbetonipaalujen valmistus tapahtuu tehdasolosuhteissa kiinteästi sijaitsevilla tehtailla. Opinnäytetyössä tarkastellaan betonipaalujen valmistusta työmaaolosuhteissa, jonka vuoksi betonipaalujen valmistusta tarkastellaan tässä opinnäytetyössä Kymppibetoni Oy:n siirrettävällä paalutehtaalla. (Kuva 4.) Tehtaalla valmistetaan 300 x 300 betonipaaluja aina työmaan tarpeiden mukaisesti.



Kuva 4: Siirrettävä paalutehdas.

Paalun valmistus työmaalla

Paalun valmistus työmaalla koostuu seuraavista päävaiheista: raudoituksen valmistus, betonin valmistaminen ja betonointi. Valun jälkeen paalu jätetään muottiinsa asettumaan vuorokaudeksi, jolloin se saavuttaa tarvittavan purkulujuuden. Muotista irrotuksen jälkeen paalu siirretään varastoon, missä se saavuttaa standardien vaatiman lujuustason vuorokauden kuluessa.

3.2 Betonipaalujen valmistustoleranssit

Betonipaalujen valmistustoleranssit ovat:

- Mikäli paalun sivumitta on nimellismittaa suurempi, voidaan betonipeitteen paksuus mitata nimellismitasta.
- Osapaalujen jatkospintojen kulmapoikkeama saa olla enintään 1:150.
- Paalun kärkivahvikkeen kulmapoikkeama saa olla enintään 1:75.
- Paalun nimellispituus: + 150 mm, -100mm
- Paalun yläpinnan ja alapinnan tulee olla kohtisuorassa paalun keskiakselia vastaan ja sen suhteen symmetrisiä. Kulmapoikkeama ei saa ylittää poikkileikkauksen matkalla 1/100.
- Raudoitustankojen päiden välisen eron tulee olla alle 20 mm.
- Paalut on suunniteltu 100 vuoden käyttöiälle rasitusluokassa XC2.
- Paalun keskilinjan sivuttaispoikkeama saa olla enintään 0,2 % mittaispisteiden välimatkasta.

Kuva 5. Valmistustoleranssit (SFS-EN 12794).

Seuraavia toleransseja sovelletaan, ellei yksittäisille paaluille tai osapaaluille ole määritetty tiukempia toleransseja:

- Paalun varren akselin tulee olla suora valmistuksen jälkeen ja ilman taivutusjännitysten vaikutusta. Suoruuden sallittu valmistuspoikkeama on esitetty taulukossa 2.
- Poikkileikkauksen mittojen L sallittu poikkeama nimellismitoista on ΔL , ks. taulukko 2
- Paalun yläpinnan ja paalun alapinnan tulee olla kohtisuorassa paalun keskiakselia vastaan ja sen suhteen symmetrisiä. Kulmapoikkeama ei saa ylittää taulukossa 1 esitettyä luokan AD1 tai AD2 arvoja.
- Paalun yläpinnan tulee olla tasomainen tai kupera.
- Betoniterästen ja jänneterästen sijainnin sallittu poikkeama on Δd raudoituksen tehollisen korkeuden nimellisarvosta d ja Δc betonipeitteen nimellisarvosta c_{nom} , katso taulukko 2.
- Jokaisen raudoitustangon betonipeitteen paalun yläpinnasta ja paalun alapinnasta mitattuna tulee olla välillä 10...50 mm ja raudoitustankojen päiden välisen eron tulee olla alle 20 mm. Raudoituksen sijainti ja sijainnin toleranssit tulee määrittellä valmistuspiirustuksissa.

Kuva 6. Valmistustoleranssit (SFS-EN 12794).

Taulukko 1. Paalun enimmäiskulmapoikkeaman luokat (SFS-EN 12794).

Luokka	Sallittu enimmäispoikkeama
Luokka AD1	Poikkileikkauksen matkalla 1/100
Luokka AD2	Poikkileikkauksen matkalla pienempi arvoista 3/100 tai 10 mm

Taulukko 2. Betonipaalujen mittojen ja betonipeitteen sallitut poikkeamat (SFS-EN 12794).

Poikkileikkauksen tavoitemitta tarkistettavassa suunnassa	ΔL	Δd	Δc
Paalun poikkileikkauksen mitat	+15	-10	-10

Todellisen poikkileikkauksen tulee olla suurempi kuin 95 % nimellispoikkileikkauksesta	-10		
Paalun nimellispituus	+150 -100		
Varren akselin suoruus $L \leq 10$ m $10 \text{ m} \leq L < 20$ m $L \leq 20$ m	± 20 $\pm 2 L^1$ ± 40		
HUOM. 1 ΔL ja Δd annetaan sen varmistamiseksi, että poikkileikkauksien mittojen tai $A1 > \text{suoruuden} < A1$ tai raudoituksen sijainnin poikkeamat eivät ylitä niitä arvoja, jotka Eurokoodien kysymykseen tulevat varmuusluvut kattavat. HUOM. 2 Δc :n arvot annetaan säilyvyyttä varten.			
Tässä yhtälössä pituuden L yksikkö on m.			

3.3 Paalujen varusteiden toleranssit

Paalun valussa olevien osien keskipisteiden poikkeama paalun/osapaalun keskiakselista voi olla enintään 10 mm. Kalliokärjen pituus tulee määrittää siten, että paalun alapään ja pohjalevyn vaurioituminen estetään paalua lyödessä, esimerkiksi vinoa kalliopintaa vasten. Vaatimukset täyttyvät, kun paalunvarren ja kalliokärjen liittymäkohdan sekä kalliokärjen kärjen välinen kulma on minimissään 60 astetta. Teräsbetonipaalujen kalliokärkien kelpoisuus varmistetaan lyöntikokeella. Teräsbetonipaalun osalta kelpoisuuden osoittaminen tehdään harmonisoidun tuotestandardin SFS-EN 12794 mukaisella lyöntikoemenettelyllä. Kalliokärkien puristuskestävyys osoitetaan lyöntikokeella siten, että kalliokärjen on kestävä lyöntikoe ilman, että kalliokärkeen tulee toimintaa haittaavia muodonmuutoksia. Varusteiden toimittajat testaavat tuotteensa SFS-EN 12794 -standardin A mukaisesti.

3.4 Betonimassa

Kymppibetoni Oy:n siirrettävä betoniasema pystyy valmistamaan betonimassaa täysin automaattisesti. Valmistusprosessin aikana otetaan säännöllisesti betonimassasta näyt-

teitä, joita käytetään varmistamaan betonin lujuus. Betonin valmistusta on käsitelty tarkemmin kansallisessa ohjeessa BY65 (2021) ja BY206(2014). Betonin koostumuksen tulee vastata rakennuspaikan maaperäolosuhteiden rasitusluokkaa. Betonissa käytetään mahdollisimman vähähiilistä sementtiä.

Kymppibetonin betoniasemat täyttävät on valmisbetonituoteryhmän (TR 62:2014) täytämät vaatimukset. Ne ovat Kiwa Inspectan tarkastamia.

3.5 Rauditus

Paalujen rauditus voidaan tehdä koneellisesti tai käsin. Nipussa ollut hakateräs leikataan ensin oikean pituiseksi, jotta paalussa on vaatimusten mukainen määrä hakaterästä. Tämän jälkeen hakateräs vedetään auki koko paalun matkalle ja kiinnitetään pääteräksiin joko metallilangalla tai pistehitsaamalla. (Kuva 7.) Valmiiseen raudoitteeseen tulee myös kiinnittää oikeanlaiset välikkeet, jotta mahdollistetaan vähimmäisbetonipeite. (SFS EN 12794.)



Kuva 7. Raudoitus valmiina kalliokärjillä varustettuna.

Pääteräksinä raudoitteissa tulee käyttää standardien SFS 1216 tai SFS 1215 mukaisia harjateräksiä.

P (1) - luokan paalujen tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- Paaluissa, joiden poikkileikkausmitta on vähintään 300 mm, poikittaisraudoituksen halkaisijan tulee olla vähintään 5 mm.

- Paaluissa, joiden poikkileikkausmitta on pienempi kuin 300 mm, poikittaisraudoituksen halkaisijan tulee olla vähintään 4 mm.
- Välihakojen ja kierrehakojen nimellishalkaisijan tulee olla vähintään 4 mm.
- Paalun yläpään poikittainen raudoitus tulee ulottaa vähintään 500 mm pituudelle. Tällä vähimmäispituudella hakoja tulee olla vähintään 9 kappaletta.
- Jos paalun alapää tukeutuu pehmeään maakerrokseen, tulee alapään poikittainen raudoitus ulottaa vähintään 200 mm:n pituudelle. Tällä vähimmäispituudella hakoja tulee olla vähintään viisi kappaletta. Jos paalu tukeutuu kovaan kallioon tai moreenikerrokseen, tulee alapään poikittainen raudoitus ulottaa vähintään 500 mm:n pituudelle. Hakojen lukumäärä sovitetaan vastaavasti.
- Paalun varren poikittaisraudoituksen tulee jakautua tasaisesti paalun yläpään ja paalun alapään välillä. Hakojen keskinäinen etäisyys saa olla korkeintaan kolme kertaa varren pienempi paksuus, ks. taulukko 3

Taulukko 3. Jänneterästen vähimmäismäärä (SFS EN 12794).

Paalun pituus L m	Prosenttiosuus betonipoikkileikkauksesta mm^2
alle 10	0,1
10...20	0,01 L
Yli 20	0,2

3.6 Paalumuotti

Paalu valetaan teräsmuotissa, joka on aseteltu tukevalle pohjalle ja ankkuroitu maahan. Ankkurointi mahdollistaa paalujen pois nostamisen muotista. Pedin pituus on 16 m ja metallisia kouruja siinä on 10 kpl vierekkäin. (Kuva 8.) Kouruja on mahdollista myös laittaa peräkkäin, mikä mahdollistaa eri pituisten paalujen valamisen. Paalun pituutta pystytään säätämään siten, että välikettä siirretään muotissa. Yhdessä kourussa pystytään samanaikaisesti valamaan kahden mittaisia paaluja, siten että paalujen väliin laitetaan välike, joka erottaa paalut toisistaan.

Ennen valua kouruun tulee asentaa kaikki tarvittavat paaluvälineet. Kourut tulee myös kyllästä öljyllä, jotta paalujen pois nostamisen olisi mahdollista. Kourun lämmitys tapahtuu sähkövastuksilla. Lämmitysvälineitä tarvitaan pääasiassa kylmän sään aikaan. Kesällä sähkövälineiden tarve pienenee, koska paalun lujuuden kehitys tuottaa lämpöä. Eristekannet kourun päällä ehkäisevät lämmön haihtumista ja näin ollen nopeuttavat betonin kovettumista.



Kuva 8. Paalupeti.

3.7 Laadunvalvonta ja puristuslujuus

Tuoreen betonin näytteenotossa ja testauksessa noudatetaan standardia SFS-EN 13670. Työsuunnitelmaa tulee myös noudattaa paikalla valettavien paalujen kanssa. Testattavien sylinteri- tai kuutiokoe-kappaleiden minimimäärä on kolme yhdessä näyte-erässä. Jokaisesta näyte-erästä vähintään yksi koe-kappale tulee säilyttää, kunnes betonin kelpoisuus on todettu 28 päivän ikäisenä tehdyistä kokeista. Kaikkien testien tulokset kirjataan ja säilytetään, ja koe-eräkohtaiset tulokset mainitaan paalutuspöytäkirjoissa. Betonin testauksessa sovelletaan standardin EN 13369:2004 kohtaa 5.1 (RIL-254-2016.)

3.7.1 Puristuslujuus

Paalun asennuskestävyyden todentamisessa käytetään betonin ominaislujuutta paalun asennushetkellä. Paalun asennuskestävyyden tulee olla asianmukaisten asiakirjojen tai muiden käyttöpaikalla voimassa olevien sääntöjen mukainen ottaen huomioon erityiset maantieteelliset olosuhteet, jotka koskevat nimenomaan betonisten paalujen asentamista.

Betonin lujuusluokan varmistamiseksi puristuslujuus määritetään potentiaalisen lujuuden perusteella; valmistaja voi käyttää suoraa rakenteellista lujuutta tai epäsuoraa rakenteellista lujuutta sen vahvistamiseen. Potentiaalinen lujuus on testattava 28 päivän kuluessa. Potentiaalisen lujuuden testit voidaan suorittaa ennen 28 päivää potentiaalisen lujuuden etenemisen arvioimiseksi tai potentiaalisen lujuuden ennakoimiseksi 28 päivän iässä sopivan kovettumislain mukaisesti. Tarvittaessa testejä voidaan suorittaa 28 päivää vanhempana. Potentiaalisen lujuuden määrittämiseksi sovelletaan seuraavia standardeja: EN 206:2013 ja A2:2021. (RIL-254-2016.)

3.7.2 Suora rakenteellinen lujuus

Puristuksen suora rakenteellinen lujuus on määritettävä valmiista tuotteesta poraamalla koekappaleita EN 12504-1:n mukaisesti, jotka on muunnettu kuutioksi tai sylinteriksi asianmukaisella korjauskertoimella (RIL-254-2016).

3.7.3 Epäsuora rakenteellinen lujuus

Vakautettuja tuotantoprosesseja varten, joissa betonin koostumusta ja kovettumismenetelmiä ei muuteta, epäsuora rakenteellinen puristuslujuus voidaan määrittää koekappaleista. Koekappaleet tulee tehdä tuoreesta betonista. Ne tulee kovettaa ja varastoida tehdasolosuhteissa niin lähellä esivalmistetun betonituotteen olosuhteita kuin mahdollista, edellyttäen että alkutesti on määrittänyt korrelaation suoran rakenteellisen lujuuden kanssa. Tiheyttä voidaan käyttää ominaisuutena korrelaation määrittämiseksi. Väliaikaisissa tilanteissa tuotannon aikana kypsyyden funktioita voidaan käyttää rakenteellisen lujuuden määrittämiseen, jos korrelaatio lujuuden ja kypsyyden iän välillä on vahvistettu alkutestauksen aikana. (RIL-254-2016.)

3.8 Valmiiden tuotteiden vaatimustenmukaisuus

Valmiiden tuotteiden vaatimustenmukaisuus todennetaan taulukon 4 mukaisesti. Tarkistus tulee suorittaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, mieluiten tehtaassa tai tehtaan varastossa, eikä sitä saa koskaan suorittaa sen jälkeen, kun asiakas on ottanut kappaleet vastaan ja hyväksynyt ne. Tämä vaatimus koskee myös työmaaolosuhteissa valmistettuja betonipaaluja. (SFS-EN 12794.)

Taulukko 4. Valmiiden tuotteiden tarkastus. (SFS-EN 12794).




Kohde	Ominaisuus	Menetelmä	Tiheys	Kirjaustapa
Elementit	Kokonaispituus	Mitat todenne- taan standardin En 13369 mu- kaisesti.	Yhdelle elemen- tille kerran kuussa jokaiselta valulin- jalta ja mille ta- hansa tuotetyy- pille	Merkintä kir- jauslomakkee- seen
Elementit	Suoruus	Silmämääräi- nen tarkistus	Yksi silmämääräi- nen tarkistus jo- kaiselta valulin- jalta päivässä	Huomautus vir- heistä kirjauslo- makkeeseen.
		Mittaus tulee suorittaa kah- dessa suun- nassa.	Yhdelle elemen- tille kerran kuussa jokaiselta valulin- jalta	Huomautus vir- heistä kirjauslo- makkeeseen.
Elementit	Merkintä	Silmämääräi- nen tarkistus	Silmämääräinen tarkistus päivittäin	Merkintä kir- jauslomakkee- seen
Elementit	Muut geometri- set toleranssit	Mitat todenne- taan standardin En 13369 mu- kaisesti.	Yhdelle elemen- tille kerran kuussa jokaiselta valulin- jalta	Merkintä kir- jauslomakkee- seen

Valmistajan tulee pitää valmistetuista elementeistä tiedostoja (yksilöllinen koodi/merkki, tuotannon sijaintipaikka, valupäivä), arkistoida tiedot vaadittavaksi ajaksi ja toimittaa nämä tiedot vaadittaessa käytettäväksi.

3.9 Merkintä ja varastointi

Kuten kuvassa 9, paalu, joka on valmistettu RT-tuotelehden mukaisesti, tulee merkitä Rakennusteollisuuden RT-tunnuksella, paalutusohjeen julkaisuvuodella ja paalun poikileikkaus mitalla. Kaikki osapaalut tulee merkitä minimissään seuraavilla tiedoilla (Rakennusteollisuus 2022):

- rasitusluokka
- paalun ja kärjen tyyppi, pituus ja paino
- valmistuspäivämäärä
- valmistaja
- tarkastetun valmistuksen toimielimen merkki ja/tai CE-merkintä

Paalun valmistaja Oy Perustajantie 1 00100 Osoite www.valmistaja.fi/DoP DoP: 333 EN 12794 Perustuspaalut Paaluluokka 1 Jatkosluokka A	 18
 Paalun tyyppi RTB-300-16SR	
Paalun tiedot AP-12-KK	
Paaluelementin paino 2700 kg	Valupäivä 14.2.2018
Paalun pituus 12 m	Rasitusluokat XC2, XA3

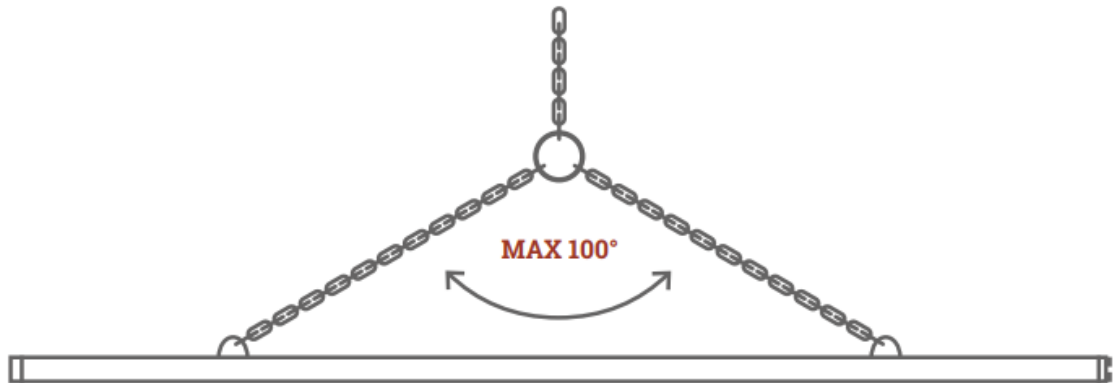
Mahdollinen lisätarkenne erikoispaaluille	
PO-2016 mukainen paalu	
Paalun koko	
Paalun tyyppi	
RT tuotelehden mukainen paalu	
	RT B - 250 - 16 C - 300 350 SR E SRE
Paalun pään varusteet Kalliokarki = KK Jatkos = JA Maakarki = MK	
Elementin pituus	
Yläpaalu = YP Valipaalu = VP Alapaalu = AP Yksimittainen paalu = YM	
	YP - 3 - KK VP - AP - 15 - MK YM

Kuva 9. Betonipaalun tuotekortti (Rakennusteollisuus 2022).

Valmistajan tulee laatia ohjeistus, jossa selitetään, mitä merkintä tarkoittaa. Lisäksi on laadittava ohjeet paalujen käsittelystä kuljetuksen, varastoinnin ja työmaalla tapahtuvan noston aikana. Jokainen jatkamaton paalu tai osapaalu tulee varustaa merkillä, joka on lähellä paalun yläpäättä. Osapaaluissa on osoitettava paalujatkoksen tyyppi. Jatkamattomaan paaluun tai osapaaluun tulee merkitä selvästi varastoinnin ja kuljetuksen aikaiset tuentakohdat, nostokohdat ja tarvittaessa yläpää ja alapää.

Työmaalla paalut sekä paaluissa käytettävät varusteet tulee varastoida ja käsitellä siten, että ne eivät vaurioidu. Paalutuotteen varastointi alusta tulee olla niin suora, että paalut eivät pääse vaurioitumaan varastoinnin aikana. Paalut tulee varastoida rinnakkain nostolenkkien kohdalle laitettujen, esimerkiksi puusta olevien tukien varaan tai vaihtoehtoisesti tasaiselle maalle. Paaluja ei suositella pinottavan useampaan kerrokseen.

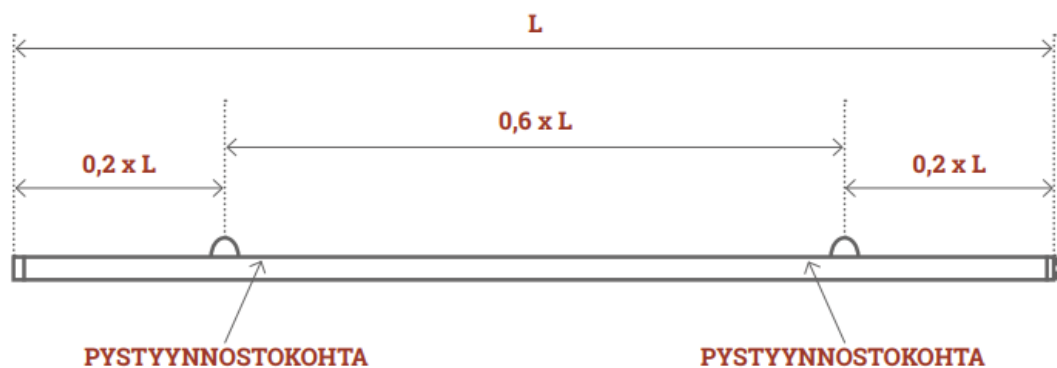
Paalut ja niissä käytettävät varusteet tulee tarkastaa ennen asennusta. Suositeltavin tapa siirtää paalua työmaalla on nostaa sitä kummastakin nostolenkistä käyttämällä sallittua ketjujen haarakulmaa. (Kuva 10.)



Kuva 10. Paalun siirto työmaalla (Rakennusteollisuus 2022).

3.10 Paalujen pystyyn nosto työmaalla

Paalujen pystyyn nostossa noudatetaan valmistajan antamia ohjeita. (Kuva 11.)



Kuva 11. Paalun pystyyn nosto kohdan sijainti (Rakennusteollisuus 2022).

Nostaessa paalua nostoketju tulee kiinnittää kiristävästi paalun varteen siten, että kiinnityskohta ei siirry paalun pään ja nostolenkin välissä olevalle paalun osalle. Paalun nostaminen pystyyn pelkästään nostolenkistä ei ole sallittua. (Rakennusteollisuus 2022.)

4 Siirrettävä paalu- ja betonitehdas

4.1 Yleisesti

Nykypäivänä kuljetuskustannukset ja kuljetusten hiilidioksidipäästöt ovat merkittäviä, kun tehdään valmisbetonia ja betonipaaluja. Kuljetuskustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä voidaan pienentää etsimällä paalutuskohteen läheltä tila, johon voisi perustaa paalutehtaan. Kriteerinä on tasainen, kooltaan noin 50m x 40m:n alue esimerkiksi kiviaineksen otto alueella, jotta välttyään maanrakennus kuluilta. Kentän valaistus pystytään toteuttamaan siirrettävillä led-valaisimilla. Jos lähialueelta löytyy kiinteä betoniasema, niin silloin ei ole välttämätöntä kuljettaa omaa siirrettävää betoniasemaa, vaan pystytään hyödyntämään paikallista toimijaa. Tästä syntyy myös kustannussäästöjä: päästöt vähenevät sekä tilan tarve pienentyy. Varastoalueella pystytään säilyttämään paaluja noin yhden viikon tuotantoa vastaava määrä. Varastoalueella paalut saavuttavat lopullisen lyöntilujuuden. Lähivarastoinnilla ehkäistään myös mahdollisia toimitusviivästyksiä.

Jos työmaalle pystytään tarjoamaan esimerkiksi paalulaatan betonointi, niin silloin oman siirrettävän betoniaseman pystytys on kannattavampaa. Betoniaseman tarvitsemat raaka-aineet pyritään ottamaan mahdollisimman läheltä työmaata, jotta päästöjä ei synny. Suomessa Finnsementillä on kaksi sementtitehdasta, yksi kuonajauhetehtas sekä kahdeksan sementti- ja kuonajauheterminaalia, joten kuljetusmatkat pystytään usein optimoimaan (Finnsementti Oy n.d). Suomeen tuodaan myös laivarahtina sementtiä ja esimerkiksi Schwenk Oy:llä on terminaalit Loviisassa, Naantalissa ja Joensuussa (Schwenk Oy n.d).

Kymppibetonin siirrettävällä paalu- sekä betonitehdaskalustolla pystytään palvelemaan työmaata tehokkaammin ja kustannuskykyisillä hinnoilla. Tuotteiden laatu ja toimitusvarmuus kasvaa, kun pystytään toimimaan työmaan välittömässä läheisyydessä. Tilajalle isoimpia etuja ovat kuljetusten määrän minimointi työmaalla, sekä betonimassan tasalaatuisuus lyhyiden kuljetus matkojen ansiosta.

4.2 Kalusto

Siirrettävä betoniasema koostuu seuraavista asioista. (Kuva 12.)

- sekoitusmoduuli
- kiviainesmoduuli
- ohjausmoduuli
- generaattori*
- vesikontti**
- sementtisiilo.

*Jos paikallista sähköliitintä ei ole, joudutaan käyttämään generaattoria sähkön tuottamiseen.

**Jos paikallista vesiliitintä ei ole ja porakaivon poraaminen ei ole kustannustehokasta, joudutaan vesi tuomaan työmaalle esimerkiksi vesipostista.



Kuva 12. Siirrettävä betoniasema (Kymppibetoni Oy 2024 B).

4.3 Sääolosuhteet

Siirrettävää paalu- ja betonitehdasta pystytään käyttämään sääolosuhteista riippumatta. Sääolosuhteiden vaikutus tulee kuitenkin huomioida ja siihen tulee varautua suunnittelussa.

Talvea varten betoniasema varustellaan talvivarustuksella. Talvella paalupetejä joudutaan lämmittämään sähkövastusten avulla. Betoniasemalla pystytään lämmittämään

vesi ja kiviaines. Kiviaineksen tarve betonimassassa on suuri, joten se pyritään kuljettamaan mahdollisimman läheltä työmaata. Talviaikaan se pysyy myös sulana, kun kiviainesta tuodaan betoniasemalle vain päiväkohtainen tarve.

Siirrettävän betoniaseman ja paalutehtaan sähkön kulutus on optimoitu tarvittavaan tuotantoon, eikä sähköä kulu esimerkiksi isojen tilojen valaisuun ja lämmittämiseen kuten kiinteissä tehtaissa. Kiinteillä tehtailla joudutaan edellä mainittujen tekijöiden lisäksi myös käyttämään sähköä itse prosessiin samoin kuin siirrettävillä asemilla, muiden muassa paalupetien lämmittämiseen. Silloin kun siirrettävä paalutehdas ei ole tuotannossa, sitä pystytään säilyttämään sään mukaisissa olosuhteissa eikä se tällöin kuluta energiaa.

4.4 Ympäristövaikutukset

Työmaalla ympäristö otetaan huomioon tarkasti, jotta työmaan jälkeen alue saadaan ennallistettua alkuperäiseen tilaan. Työkoneille ja nesteille on omat valutus- ja tankkaus-alustat, jotta ympäristöön ei pääse valumaan mitään. Ympäristöhaitat pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä, mutta mahdollisia ympäristöhaittoja voivat olla (Kymppibetoni Oy 2024 A).

- maan ja vesistön saastuminen esimerkiksi ylitäytön tapahtuessa tankkaustilanteissa tai kemikaalivuoto säiliön rikkoutuessa.
- meluhaitta, työt pyritään tekemään virka-aikojen puitteissa, jotta meluhaitoilta vältytään.
- tärinää voi aiheutua, kun raskaskalusto ajaa työmaalla.
- maakerrosten tiivistyminen ja/tai siirtyminen.
- huokosvedenpaineen kasvu ja maakerrosten häiriintyminen.

4.5 Työmaan haasteet

Yksi työmaan haasteista on löytää sopivan kokoinen alue paalutehtaan perustamista varten. Alueen pitäisi olla mahdollisimman tasainen, jotta vältytään isommilta maanmuokkauksilta. Lisäksi sen pitäisi olla lähellä teräsbetonipaalujen toimituskohdetta. Alue ei saa myöskään sijaita pohjavesialueella, koska silloin toiminta tarvitsee ympäristöluvan. Toiminta ympäristöluvan tarvitsevilla kohteilla on mahdollista valtioneuvoston ympäristön suojeluvaatimuksista (858/2018) mukaisella rekisteröinti-ilmoituksella. Kentän

pitäisi olla myös hyvien kulkuyhteyksien varrella, koska kentälle ajetaan tavaratoimituksia. Teiden pitää kestää raskaan kaluston liikenne.

5 Työmaalla valetun paalun hyödyt

5.1 Teräsbetonipaalujen kuljetus

Rakennusteollisuus RT:n analyysin mukaan rakentamisesta aiheutuva hiilijalanjälki on 2 % maamme päästöistä vuodessa, mutta noin 9 % päästöistä syntyy kuljetuksista. Kuljetuksiin liittyvien tekijöiden optimointi on merkittävässä asemassa päästöjen vähentämisessä. Tekijöitä ovat muiden muassa polttoaineiden kulutus, reittivalinnat, liikenteen sujuvuus ja kuljetusmäärät. Keskeisin keino vähentää päästöjä on lyhentää kuljetusmatkoja. Käytettäessä teräsbetonipaalujen valmistukseen siirrettävää betoniasemaa ja siirrettävää paalutehdasta, kaikki edellä mainitut tekijät voidaan arvioida olevan pienempiä kuin kuljetettaessa valmispaaluja kiinteältä tehtaalta. Samalla voidaan vähentää kuljetuksien tyhjäkäyntiaikaa, jotka lisäävät päästöjä. (Raivio T, Laine A, 2020).

Tehtaalla ja työmaalla valetut paalut joudutaan kuljettamaan paalutuskoneen lähetyville. Kuljetusmatkat tehtaalta ovat yleensä paljon pidemmät kuin työmaan lähellä olevalta siirrettävältä paalutehtaalta. Valmiiden paalujen kuljetus tapahtuu työmaille nostureilla varustetuilla puoliperävaunurekoilla, jotka kykenevät itse purkamaan kuorman. Paalut nostetaan tasaiselle maalle rinnakkain ajoneuvon viereen.

Aluspuiden käyttöä suositellaan nostolenkkien kohdalla. Auton molemmin puolinen purku tulee olla mahdollista, kun paalut ovat pitkiä. Purkupaikalla tulee olla leveyttä vähintään seitsemän–kahdeksan metriä.

Auton lavalla kiinteästi oleva nosturi kykenee nostamaan maksimissaan 1900 kiloa painavan paalun enintään neljän metrin päähän ja 2800 kiloa painavan paalun 2,5 metrin päähän lavan reunasta mitattuna.

Kuormatoimitus tarkastetaan silmämääräisesti vastaanottajan toimesta. Tilaajan edustaja allekirjoittaa hyväksymisen merkiksi kuormakirjan ja tämän jälkeen toimitus on laskutuskelpoinen. Kuormatoimituksen ollessa virheellinen laadultaan tai sisällöltään, on tilaajan edustajan ilmoitettava siitä paalulähtetämisensä sekä tehdä kirjaus asiasta kuormakirjaan.

Kuten kuvassa 13 kuormatoimitus tehdään täysinä kuormina ostajan edustajan ja tilausvahvistuksen ilmoittaman kuormatilauksen perusteella. Auton kantavuus ja paalun poikileikkaus määräävät, kuinka monta metriä paalua mahtuu yhteen kuormaan.



Kuva 13 Valmis paalu kuljetus.

Täyden kuorman pituudet ja painot ovat esimerkiksi seuraavat:

- 250 x 250 mm² Noin 28 tonnia / 180 metriä
- 300 x 300 mm² Noin 28 tonnia / 125 metriä
- 350 x 350 mm² Noin 28 tonnia / 90 metriä.

Kuorman toimitus voi vaihdella 28 tonnin ja 31 tonnin välillä riippuen paalun pituudesta poikkileikkauksesta, ja auton kantavuudesta.

Paalut kuljetetaan paalutuskoneen välittömään läheisyyteen, josta se ulottuu nostamaan paalun pystyyn. Ostajan tulee huolehtia työmaateistä siten, että paaluauto kykenevät liikkumaan niillä ongelmitta. Teiden kantokykyyn ja liukkauden torjuntaan tulee erityisesti kiinnittää huomiota. Paaluauton kuljettajan ei tarvitse ajaa tilaajan edustajan osoittamaan paikkaan, jos työmaan olosuhteet eivät hänen mielestään sitä edellytä. (Rudus Oy 2024.)

Työmaalla valmistettujen paalujen kuljetusten osalta optimaalisin tilanne saavutetaan silloin kun paalutehdas voidaan sijoittaa niin lähelle paalutusaluetta, että paalujen kuljetus

voidaan toteuttaa esimerkiksi pyöräkuormaajalla suoraan paalutuskoneelle. Etäisyys tulisi tuolloin olla muutamia satoja metrejä.

5.2 Kustannussäästöt

Kustannussäästöjä arvioitaessa ensimmäinen tekijä on siirrettävän betonitehtaan ja paalutehtaan siirron kannattavuuden arviointi. Arvioinnissa huomioidaan muiden muassa työmaan etäisyys kiinteästä paalutehtaasta, arvioitu paalumenekki sekä itse siirrettävän betonitehtaan ja paalutehtaan siirtokustannukset. Paalun hintaan vaikuttava merkittävä tekijä on työmaan etäisyys paalutehtaasta (Auranmaan teräspaaluttajat Oy 2024). Siirrettävän paalutehtaan perustamiskustannukset muodostuvat lupamaksuista, lavettikuljetuksista ja nosturikustannuksista. Nämä arvioidaan olevan merkittävästi pienemmät kuin kilometrikustannukset, jotka syntyvät paalujen kuljetuksista kiinteältä tehtaalta työmaalle pelkästään polttoainekustannuksista (kts taulukko 5). Siirrettävän paalutehtaan peti ei ole kertakäyttöinen, vaan sitä voidaan käyttää useilla työmailla, joten sen valmistuksen aiheuttamat kustannukset vertautuvat vastaaviin peteihin kiinteillä tehtailla.

Kustannussäästöjä voidaan saada aikaiseksi myös optimoimalla raaka-aineiden kuljetukset. Betoniin tarvittava kiviaines, raudoitteet ja sideaineet voidaan saada kuljetettua läheltä tai ne joudutaan kuljettamaan kaukaa, riippuen työmaan asemoitumisesta. Tässä opinnäytetyössä tätä tekijää ei ole huomioitu, koska raaka-aineet joudutaan kuljettamaan niin kiinteälle tehtaalle kuin siirrettävälle paalutehtaalle, ja nämä tekijät on sisällytetty niin kiinteällä tehtaalla kuin siirrettävällä tehtaalla tehtyjen paalujen hintatarjoukseen. On kuitenkin hyvä huomioida, että kiinteillä tehtailla nämä kustannustekijät lienevät yleensä vähemmän muuttuvia kuin siirrettävällä paalutehtaalla, jossa raaka-aineiden saatavuus ja kuljetustekijät muuttuvat työmaakohtaisesti. Nämä on arvioitava aina työmaakohtaisesti edellä olevan kappaleen kuvaamalla tavalla.

Kuljetuskustannukset koostuvat lukuisista eri tekijöistä, muiden muassa kuljetuskaluston kiinteistä kustannuksista (esimerkiksi ajoneuvoon sitoutuneesta pääomasta, vakuutusmaksuista, liikennöimismaksuista ja ylläpitokustannuksista) ja muuttuvista kustannuksista (esimerkiksi polttoainekustannukset, korjaus- ja huoltokustannukset, voiteluainekustannukset sekä rengaskustannukset) sekä työ kustannuksista (esimerkiksi kuljetta-

jien palkat). Käytännössä esimerkiksi paalujen hintaan on yleensä sisällytetty kuljetushinta ja paalujen purku työmaalla, koska paalujen kuljettamiseen tarvitaan erikoiskalustoa. Kuljetuskustannukset voivat kuitenkin olla jopa 1/4 paalun hinnasta. Kuljetuskustannukset paalukuljetuksissa yleensä huomioidaan osana tarjousta esimerkiksi liitteen 1 mukaisesti. (Karhunen & Hokkanen 2007)

Näin ollen tämän opinnäytetyön kuljetuskustannusvertailussa huomioidaan vain polttoainekustannukset ja hiilidioksidipäästöt yhden kilometrin ja 50 kilometrin päähän. Tarkasteluesimerkissä paalutustyömaalla tarvitaan 300 x 300 teräsbetonipaalia 50 kilometriä. Niiden kuljettamiseen tarvitaan noin 400 puoliperävaunuyhdistelmää (50 000 m / 125 m = 400). Taulukossa 5 esitetään esimerkki kustannusten synnystä ja kuljetuksen CO²-päästöistä. Laskentaperusteet ovat seuraavat:

- Kiinteä paalutehdas sijaitsee työmaalta 50 km:n päässä.
- Siirrettävä paalutehdas saadaan sijoitettua työmaan välittömään läheisyyteen yhden kilometrin päähän.

Taulukko 5. Kuljetuskustannusvertailu.

	Paalujen kustannukset.					
	Tehdas- olosuhteissa		Työmaa- olosuhteissa			
Etäisyys työmaalle	50		1		k	m
Paalumenekki	50000				m	
Puoliperävaunun kuljetuskyky	125				m	
Kuljetusten määrä	400				kpl	
Syntyvien kilometrien määrä.	40000	km	800	km		
Polttoaineen kulutus	12000	l	240	l		
Polttoaineen litrahinta	1,8	e/l				
	21600	e	432	e		
Polttoainesäästö			21168	e		
Co-2 päästöt (co2-muunnin)	5596,0	kg	111,9	kg		
Co-2 päästöt, jotka aiheutuvat betoniaseman ja paaluteh- taan siirrosta	500	km	70	kg		

Betoniaseman ja paalutehtaan siirron polttoaine kustannus	500	km	150	I	
			270	e	

Paalujen kuljetuskustannussäästöjen lisäksi on mahdollista saada aikaan kustannussäästöjä muiden muassa betonin kuljetuksissa esimerkiksi siten, että työmaalla tarvittava kokonaisbetonimäärä (paalut, muut rakenteet) on niin merkittävä, että betoniasema kannattaa myös siirtää työmaalle. Näin ollen valmisbetoniakaan ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja, vaan senkin kuljetus tapahtuu työmaan sisäisenä kuljetuksena.

Lyhyemmillä kuljetusetäisyyksillä voidaan hallita paremmin myös kuljetuksiin liittyviä riskejä. Näitä riskejä ovat muiden muassa kuljetuskalustoon ja reittiin sekä lastiin liittyvät riskit (muiden muassa kuormaus). Sään vaikutukset kuljetuksiin ovat suuri tekijä. Lisäksi on huomioitava henkilöstölle ja henkilöstöstä aiheutuvat riskit, joita ovat erityisesti työturvallisuuteen liittyvät riskit. (Sallinen, S. 2011)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Paalutustyömaan sijaitessa kaukana perinteisestä kiinteästä paalutehtaasta, pystytään siirrettävällä paalutehtaalla ja betoniasemalla saavuttamaan optimiolosuhteissa huomattavat säästöt, kun vältetään isoilta kuljetuskustannuksilta. Myös hiilijalanjälki pienenee tämän myötä. Kuljetuksiin liittyy myös paljon riskejä, kun liikutaan tien päällä. Paalukuormatoimituksen myöhästyessä vaikutukset näkyvät työmaalla välittömästi ja kustannuksia syntyy, kun työmaalla tapahtuu viivästyksiä. Pahimmassa tapauksessa paalukuormien viivästykset voivat vaikuttaa työmaan ajallaan valmistumiseen ja mahdollisesti kustannusten lisääntymiseen esimerkiksi sovittujen ja siten siirtyvien muiden työvaiheiden vuoksi. Siirrettävällä paalutehtaalla pystytään ennakolta varautumaan mahdolliseen nopeampaan paalujen toimitukseen ennalta, jos työmaalla tarvitaan enemmän paalua kovan paalutustahdin vuoksi. Sääolosuhteiden vaikutus tulee huomioida ja varautua suunnittelussa, esimerkiksi kova pakkanen.

Siirrettävän betoniaseman pystyttäminen ei ole kustannusten vuoksi kannattavaa jokaiselle työmaalle. Pienemmillä työmailla betoni kannattaa pyrkiä ostamaan paikalliselta toimijalta, jos sellainen löytyy lähialueelta. Siirrettävän betoniaseman pystyttäminen kannattaa silloin, kun menekit ovat suuria. Esimerkiksi kun paalujen lisäksi työmaalle saadaan myytyä työmaan tarvitsemaa muuta valmisbetonia. Valmisbetonia käytetään esimerkiksi paalulaatassa. Infrakohteissa betonin ilmamääräprosentit ovat tarkkoja. Siirrettävällä betoniasemalla pystytäänkin paremmin kontrolloimaan ilmamääriä, kun kuljetusmatkat ovat lyhyet. Näin estetään myös kaatopaikalle menevän betonin syntyä.

Kymppibetonin kehitelemä siirrettävä paalutehdas on nykyisellä kokoonpanolla valmis työmaalle tuottamaan paalua, mutta kehitystyö kustannusten ja tuottavuuden optimoimiseksi jatkuu.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin Kymppibetoni Oy:lle tietyissä olosuhteissa kustannustehokas vaihtoehto tuottaa teräsbetonipaaluja työmaaolosuhteissa sen sijasta, että ne kuljetettaisiin valmiina kiinteältä tehtaalta. Työmaata perustaessa ja harkitessa tulee huomioida teräsbetonipaalujen tarpeen ohella ennen kaikkea valmiiden teräsbetonipaalujen kuljetusetäisyys ja sen aiheuttamat päästöt, jotka arvioidaan olevan merkittävimpiä kustannustekijöitä. Siksi tässä opinnäytetyössä niitä käsiteltiin tarkemmin kahden esimerkkietäisyyden näkökulmasta.

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi tulee huomioida siirrettävän betonitehtaan siirto- ja perustamiskustannukset, siirrettävän tehtaan tarvitsemien raaka-aineiden kuljetusetäisyys, energian tarve ja sen saati- tai tuotantomahdollisuudet, perustamispaikka ja sen etäisyys paalutuskohteesta, sääolosuhteet ja vuoden aika. Nämä tekijät tulee huomioida työmaakohtaisessa kustannuslaskennassa ja -vertailussa, jonka jälkeen päästään lopulliseen ratkaisuun. Työmaakohtainen laskenta on edellytys kustannustehokkuuden arvioimiseksi ja lukuisten erilaisten työmaavaihtoehtojen huomioimiseksi. Tärkeää on tunnistaa kustannuksia ja päästöjä aiheuttavat päätekijät ja muut tekijät, joiden yhteisvaikutuksen perusteella voidaan tehdä tarkoituksenmukaisimmat päätökset.

Opinnäytetyön aikana tunnistettiin jatkotutkimuksen aiheina muiden muassa toiminnan tehostaminen raudotteiden valmistamisen optimoimisella siirrettävällä paalutehtaalla.

Lähteet

Betoniteollisuus ry. 2022. Paalut. Viitattu 20.5.2024. Saatavilla: [<https://betoni.com/rakentaminen/paalut/>].

BY 65, 2021. By 65 Betoninormit 2021. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Emeca Oy 2024. Tuotteet. Viitattu 29.5.2024.

Finnsementti Oy n.d. Toimipaikat. Viitattu 27.5.2024.

Juhila, Kirsi. Tietoarkisto, laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet. Saatavilla: [Laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet - Tietoarkisto (tuni.fi)]. Viitattu 1.6.2024.

Karhunen J. & Hokkanen, S. 2007. Kansainväliset tavarakuljetukset. Jyväskylä: Gummerus Oy.

Kymppibetoni Oy (Kymppibetoni A), Poikkeuksellisten tilanteiden suunnitelma. PDF. Viitattu 5.4.2024.

Kymppibetoni Oy (Kymppibetoni B). Kuva-arkisto PDF. Viitattu 5.4.2024.

Laaksonen, H. 2024. Haastattelu Kymppibetoni Oy:n toimitusjohtajaa Heikki Laaksosta haastatteli 5.4.2024 Erik Sirkama.

Laitakari, A. N.d. Teräsbetonipaalujen ja RR-paalujen hintavertailu. Helsinki: Finnmap Consulting. Viitattu 10.5.2024.

Raivio T, Laine A, Klimscheffeskij M, Heino A, Lehtomäki J. 2020. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020 2035–2050. Gaia Consulting Oy.

Rakennusteollisuus RT. 2022. PO-2016 mukaiseen paalutuksen suunnitteluun ja paalutustyöhön RT betonipaaluilla. Saatavilla: [<https://betoni.com/wp-content/uploads/2022/11/RT-Betonipaalut-Tuotelehti-17-11-2022.pdf>]. Viitattu 3.4.2024.

RIL 254-2016. Paalutusohje. Helsinki 2016. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Rudus Oy 2024. [Saatavilla [Rudus.fi/Betonituote/Rudus_paalutoimitus.pdf](https://rudus.fi/Betonituote/Rudus_paalutoimitus.pdf)]. Viitattu 23.4.2024.

Sallinen, S. 2011. Riskienhallinta. Teoksessa Vesterinen, P. (toim.) Turvaa logistiikka – kuljetusten ja toiminnan turvallisuus. Hämeenlinna: Kauppakamari.

Schwenk Oy n.d. Schwenk Suomessa. Viitattu 5.6.2024

SFS-EN 12794. Betonivalmisosat. Perustuspaalut. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 13369. Yleiset säännöt esivalmistettujen betonituotteiden osalta. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Sillanpää, T. 2024. Haastattelu Auranmaan Teräspaaluttajat Oy:n toimitusjohtajaa Toni Sillanpäää haastatteli 16.5.2024 Erik Sirkama.